

様式 C-19

科学研究費助成事業(科学研究費補助金)研究成果報告書

平成 24 年 5 月 1 日現在

機関番号：15401
 研究種目：基盤研究 (A)
 研究期間：2009 ～ 2011
 課題番号：21246060
 研究課題名 (和文) 多層薄膜スロット導波路による mV 駆動ポリマ光スイッチの研究
 研究課題名 (英文) Reduction of switching voltage for electro-optic polymer switches based on multilayer slot waveguide structures
 研究代表者 榎波 康文 (Enami Yasufumi)
 広島大学・ナノデバイス・バイオ融合科学研究所・特任教授
 研究者番号：90377474

研究成果の概要 (和文)：新規ハイブリッド型ポリマ方向性結合器型及びハイブリッド型ポリマ光変調器の長期安定性を実証した。さらに新規多層薄膜スロット光導波路型ポリマ光変調器を使用することによりデバイス電極間隔を短縮し従来の光導波路構造により電界強度を1桁増加した。実験及びモード計算結果に基づきスロット薄膜間にEOポリマを閉じこめた多層薄膜スロット導波路型光変調器の電極間隔を1 μ m以下 (従来型の1/10以下) とし、印加電界強度を10倍増加することに成功した。

研究成果の概要 (英文)：We demonstrated novel hybrid sol-gel silica/electro-optic (EO) polymer directional coupler switches, and long-term stability for a hybrid sol-gel silica/EO polymer modulators. Moreover, we enhanced the applied field by one order of magnitude in novel multilayer slot waveguide modulators, after experimental and numerical analysis was performed for the reduction of the inter-electrode distance in the waveguides. We reduced the inter-electrode distance down to 1 μ m in the multilayer slot waveguide modulators without suffering further optical loss, which results in ten times enhancement of the field.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	22,100,000	6,630,000	28,730,000
2010 年度	6,100,000	1,830,000	7,930,000
2011 年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
年度			
年度			
総計	32,100,000	9,630,000	41,730,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：光スイッチ、フォトニックネットワーク、有機化学、超高速情報処理

1. 研究開始当初の背景

EO ポリマは EO 係数が高いため、微弱な電圧信号で光スイッチングや光変調が可能で

ある。したがって、従来の光通信だけではなく、携帯電話等の電波信号を光信号に変換し

た後中継局間を光ファイバで高速伝送する RF リンクや Radio Over Fiber、航空機に光変調器を搭載したミリ波リモートセンシング、衛星に搭載して衛星間を光通信するため広帯域で低消費電力化可能なポリマ光変調器の研究が米国を中心として盛んである。特に衛星に搭載する際には駆動電圧と宇宙線の影響が重要で、ポリマは宇宙線に対し強い耐久性を有することが報告されている。衛星内部での限られた電池を有効に使用するため、低電圧駆動のポリマ光変調器が必要である。また、無人偵察小型航空機に使用されている RF ケーブル類を光ケーブルに置き換えることで無人小型高速航空機の燃費向上を行うことが検討されており、そのためにも高速な光変調器の応用が求められている。近年では、PC 内部のチップ間を光ファイバで接続し高速で信号伝送をすることで、現在の集積化電子回路の限界を打破しようとする研究がインテルや IBM 等で活発である。これらの理由から集積化が容易なポリマ光変調器の研究が注目されている。

半波長電圧をさらに減少するためには、現在の光変調器で用いてきた電極間隔 $8\mu\text{m}$ を $1\mu\text{m}$ 以下まで減少し、印加電界強度を増加する必要がある。しかしながら、従来の誘電体光導波路では波長以下の領域に光を閉じ込めることは困難である。この問題解決のためスロット光導波路を使用する。近年、光を波長より小さい範囲に閉じ込めるスロット導波路を使用した光変調器やパッシブ導波路として多層薄膜スロット導波路による 8nm 膜厚への光閉じこめが報告された。光変調器に応用することで電極間隔を 10nm 以下とすることも理論的には可能となり、本研究においてはポリマ光変調器にこれらに応用する。また、高速光変調や低光損失、集積化のためにはデバイス長短縮が必要となる。

2. 研究の目的

本研究の最終目的は、研究代表者榎波と海

外研究協力者ワシントン大学 Jen が共同研究してきた有機分子ドーブポリマ光変調器のダイナミック駆動電圧(半波長電圧 V_{π})を極限にまで低減し、 60GHz 以上の高速光通信の消費電力低減を実現することである。研究代表者は海外研究協力者とともに光通信波長 1550nm においてポリマ光変調器のデバイス環境下での電気光学 (EO) 係数 170pm/V [1]、半波長電圧 0.65V [2]、帯域幅 60GHz を実現してきた(現時点において誘電体光導波路使用の光変調器最小駆動電圧)。ポリマの屈折率分散(ミリ波と通信波長の屈折率差)は 0.1 であり、ニオブ酸リチウム (LN) 結晶や半導体材料の $1/30$ 以下と小さいため、高速光変調に必要なミリ波進行波型光変調器において光波とミリ波の位相整合が容易であることに起因し 110GHz の帯域幅が実証されてきた[3]。さらに EO ポリマは LN より高い EO 係数を有することを代表者はデバイス環境で実証してきた。本研究では海外研究協力者による更なる高い EO 係数を有する EO ポリマと研究代表者が提案する集積型光スイッチ、変調器及び各種多層薄膜スロット光導波路と併用することで、既に代表者が海外研究協力者とともに実現してきた高速、低電圧駆動の光変調器の半波長電圧の更なる低減に重点を置く。また、長期安定性に優れた EO ポリマを使用し、デバイスの長期安定性実証も行い、実用化も考慮する。

3. 研究の方法

新規方向性結合器型光スイッチの低電圧駆動を実施するために、海外研究協力者ワシントン大学 Alex Jen 開発の新規 EO ポリマ AJE0100 を使用してデバイス作製を実施した。従来型方向性結合器型光スイッチに必要な方向性結合長(電極長) $L_e=7.2\text{mm}$ と同様の光変調を $L_e=1.5\text{mm}$ で実現した。スイッチング電圧 V_s を $1/2$ 以下に減少し、スイッチ

グ電圧 V_s と電極長 L_e 積 $V_s L_e = 1.26 \text{Vcm}$ を達成した。本値は、代表者実証済みの従来型 EO ポリマ AJLS102 を使用した値 2.9Vcm の $1/2$ とした。本光変調器の低電圧駆動実証により、将来の集積化応用を可能とした。

Alex Jen 開発の高性能電気光学 (EO) 有機分子クロモフォア AJE0100 を用い、ハイブリッド型ゾルゲル・EO ポリマ導波路光変調器を作製した。垂直閉込型や共平面型スロット光導波路を導入し、従来の誘電体導波路では困難であった光をナノ領域の導波路に閉じこめを可能とした。光損失は従来のスロット光導波路に比べ 10dB 以上の低損失を可能とした。さらに集積化光変調器を可能とするため新規リング共振器型光変調器を提案し、理論解析を行った。

光変調器のパッケージングと長期安定性の検証のため、ハイブリッド型ゾルゲルシリカ・EO ポリマ光変調器の解析を行うと共に、光安定性の高い Alex Jen 開発の EO ポリマを使用し、 30mW 光入力パワーに対する 1200h 以上の出力安定性検証を実施した。さらに、光変調器のパッケージングや集積化のための理論解析を実施した。

4. 研究成果

A. ポリマ光変調器の低電圧駆動

a. 新規方向性結合器型光変調器

代表者は図 1 に示す光安定性に優れた高い EO 係数を有する新規クロモフォア AJE0100 を使用し、ゾルゲルシリカガラス導波路から EO ポリマ導波路への光移譲を横方法に行うデバイス構造 (図 2 参照) を考案しその 1×2 型光スイッチ実証に成功した。数値解析及び光スイッチ実証実験を行ってきた新しい光スイッチを AJE0100 とともに作製し、光スイッチング電圧の低減を実施した。

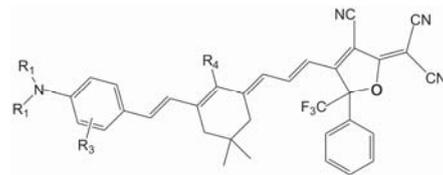
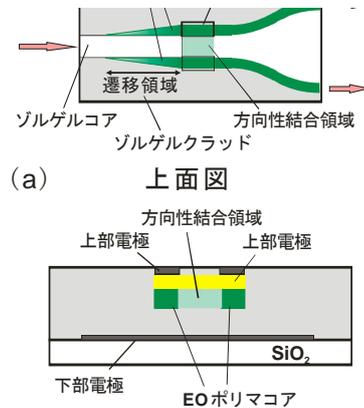


図 1 光安定性に優れた高い EO 係数を有する EO クロモフォア AJE0100



(b) 断面図(アクティブ領域)

図 2 結合長が 1.5mm の新しい方向性結合型光スイッチ

図 3 にオシロスコープ (OSC) で表示した印加電位信号とその際の変調光の一例を示す。この関係からスイッチング電圧 8.4V (デュアル駆動、電極長 1.5mm) を得た。この値は EO 係数が 78pm/V の EO ポリマ AJLS102 を使用した際のスイッチング電圧 19.5V (デュアル駆動、電極長 1.5mm) の $1/2$ 以下であり、使用した高性能 EO ポリマ AJE0100 の EO 係数が AJLS102 の 2 倍以上であることをデバイス環境下で実証した。従来の 19.5V ($V_s L_e = 2.9 \text{Vcm}$) から 8.4V ($V_s L_e = 1.26 \text{Vcm}$) へとスイッチング電圧を $1/2$ に低減した。本デバイス内部での EO ポリマの EO 係数は 160pm/V 以上を見積もった (ニオブ酸リチウムの EO 係数 30pm/V の 5 倍以上)。

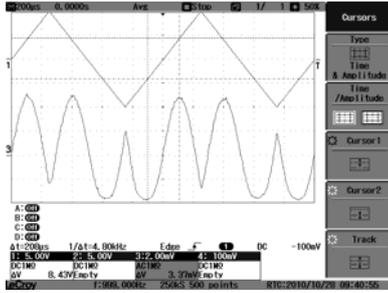


図 3 新規光スイッチ印加電位信号(上部)及び変調光(下部) $V_L=1.26\text{Vcm}$

b. 多層薄膜スロット導波路型光変調器

従来の誘電体光導波路を用いた場合、光の波長より遙かに小さいナノメータサイズの領域に十分な光を閉じこめることは困難である。本研究課題においては電極間隔を極限まで減少し数 mV の半波長電圧を実現するため図 4 に示す垂直閉込型スロット薄膜導波路をポリマ光変調器に導入した。高屈折率材料を用いたスロット光導波路は、スロット間の波長以下の領域に光を閉じ込めることが可能であることを計算により求めた(図 5 参照)。スロット薄膜間に EO ポリマを閉じこめた光変調器やパッシブ導波路として光変調器に応用することで、電極間隔を $1\mu\text{m}$ 以下(従来型の $1/10$ 以下)とした。図 6 に本光導波路から出力した光モードの測定結果を示す。本導波路は通常の光通信用光ファイバを用い表 1 に示す低い全光挿入損失(光結合損失+光導波損失)を示したことから、低光挿入損失で超低電圧駆動の光変調器として使用可能であることが分かった。さらに上部及び下部電極に金属を使用しているため、上部電極をマイクロストリップ線とすることにより電極を進行するミリ波のスキンドープ損失を低減可能であり、従来の高ドーピングシリコン電極を使用したシリコンスロット導波路型ポリマ光変調器(帯域幅 $<500\text{MHz}$)に比べて遙かに広帯域光変調可能であること見積

もった。本デバイス環境下においてワシントン大学が開発した焦電材料を用いた新規ポーリング手法を用い EO ポリマのポーリング効率を最適化する。デバイス環境下で $100\text{--}170\text{pm/V}$ の EO 係数を得た後 EO ポリマ膜厚やクラッド層材料及び膜厚の最適化を行う。本デバイスにおける半波長電圧下減少のため、EO ポリマ薄膜より 2 桁以上導電率の高いゾルゲルまたはスパッタリング TiO_2 薄膜を使用する。本直線型光導波路を用いて位相変調器を作製し位相変調器の半波長電圧測定を行う。

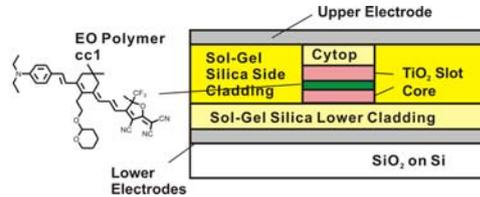


図 4 高い光出力を実証したポリマ光変調器用多層薄膜垂直閉込型スロット導波路断面図及び EO クロモフォア(特許申請済)

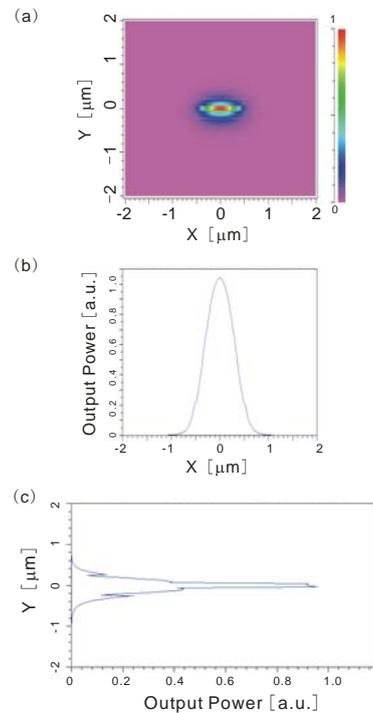


図 5 3次元 FDTD 法による新規スロット導波路内部光閉込計算結果

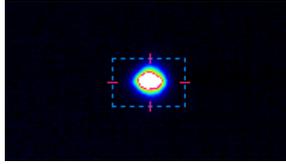


図6 スロット導波路型光変調器からの光出力写真

B. ポリマ光変調器の長期安定性

本ハイブリッド型ポリマ光変調器は、光学的及び熱的に安定なゾルゲルシリカ光導波路が安定した導波を行うため光学的安定性に優れている。そのため長期間に亘る出力の安定性検証を行った。図7に光入力30mWを用いた場合の光出力パワーを1200時間安定な光出力を測定した結果を示す。MZ光変調器からの出力は長期安定性検証の間に、MZ導波路間の位相差が蓄積され、変動するがその後位相差が解放され通常の値に戻る。したがって、この位相差による変動は導波路の劣化ではなく、安定性試験全体での光変調器出力の長期に亘る減衰はない。試験前のUV硬化エポキシの耐久性検証に時間を要したため両端面の接続によるパッケージングを実施せず試験を行った。入力面は光ファイバとの接続を行い、全てPMファイバを使用したことから軸線整合の必要性や振動に対する出力光の不安定性を局限し、市販に近い状態での光出力測定を1200hにわたり行った。全ポリマ型光変調器に比べ熱的及び光学的に安定な屈折率を有するゾルゲルガラス導波路と光ファイバを接続することにより、光ファイバとの光結合条件の経年変化が小さいことを実証した。さらに、ハイブリッド型光導波路の光導波計算から、ゾルゲルガラス導波路(屈折率1.50)よりE0ポリマ(屈折率1.60-1.70)屈折率が0.1程度大きい値が維持されている限り光導波に影響を与えないことを示した。光通信の際のE0ポリマに光化学反応に起因する屈折率変化は0.01以下でるので、本光変調器が実用の際にも長期安

定であることを示した。

本実験においてE0ポリマの光化学反応に起因する屈折率変化が光導波に影響を与えないことを実証した。この実証試験により他の全ポリマ型光変調器に比べ寿命が長く実用的な光変調器であることを示した。

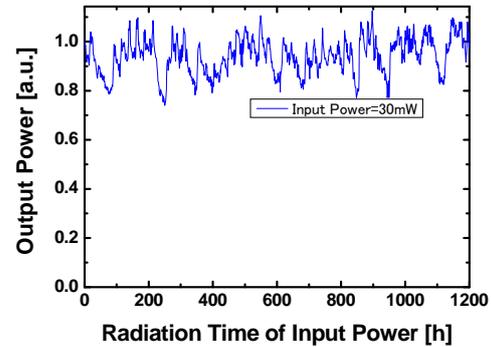


図7 高パワー30mW光入力に対する光変調器の安定性試験結果

今後の課題としてスロット導波路内部でのE0ポリマのポーリング最適化とE0係数200pm/V以上をスロット内部で実現した後、デバイス電極間隔短縮により従来の光導波路構造により電界強度を2桁増加し半波長電圧($V\pi$)10mV以下の光変調器を作製する。さらに、集積化等の応用研究として、更なるデバイス長短縮及び帯域幅60GHzを実現する。

参考文献

- [1] Y. Enami et al. *Nature Photonics*, vol. 1, pp.180, 2007.
- [2] Y. Enami et al. *Applied Physics Letters*, vol. 91, pp. 203507, 2007.
- [3] D. Chen et al. *Applied Physics Letters*, vol. 70, pp. 3335, 1997.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計8件)

- (1) Y. Enami, J. Luo, and A.K.-Y. Jen, "Short hybrid sol-gel silica/polymer waveguide directional coupler switches with high in-device electro-optic coefficient based on photostable chromophore", *AIP Advances*, vol. 1, pp. 042137(2011). DOI:10.1063/1.3662038(査読有)
- (2) J. Hong, and Y. Enami, "Modeling and analysis of microring resonator modulators with feedback waveguide coupling", in print, *J of Lightwave Technology*, vol. 29, pp. 3243-3249

(2011). DOI:10.1109/JLT.2011.2167742(査読有)

(3) Y. Enami, J. Hong, C. Zheng, J. Luo, a. K-Y. Jen, "Optical transmission stability for hybrid sol-gel silica/electro-optic polymer waveguide modulator", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 23, pp. 1508-1510 (2011). DOI:10.1109/PLT.2011.2163183(査読有)

(4) J. Hong, and Y. Enami, "Analysis of optical time-domain demultiplexer using microring resonators", *Optical Review*, vol. 17 (6), pp. 532-535, (2010).

DOI: 10.1007/s10043-010-0095-3(査読有)

(5) J. Hong, and Y. Enami, "Numerical solution of the dynamics of micro-ring resonator modulators", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 22, pp. 969-971, (2010). DOI: 10.1109/LPT.2010.2048099(査読有)

(6) Y. Enami, D. Mathine, C.T.DeRose, R.A.Norwood, J. Luo, A.K-Y.Jen, and N. Peyghambarian, "Hybrid electro-optic polymer/sol-gel waveguide directional coupler switches", *Applied Physics Letters*, vol. 94, pp.213513, (2009). DOI: 10.1063/1.3141452(査読有)

[学会発表] (計 12 件)

国際学会招聘講演

(1) Y. Enami, J. Luo, and A. K-Y. Jen, "Sol-gel waveguide for electro-optic modulators and biophotonic sensors"(invited), *Collaborative conference on 3D & Materials Research (3DMR)*, Jeju Korea (2011), 30th of Jul, 2011.

(2) Y. Enami, "Hybrid sol-gel silica/electro-optic polymer waveguide modulators (invited), *9th International Conference on Nano-Molecular Electronics*", Kobe, Japan, SS-2, (2010), 14th of Dec, 2010.

国内招聘講演

(3) Y. Enami and A. K-Y. Jen, "Electro-optic polymer modulators and biophotonic sensors based on sol-gel silica waveguides", 招聘講演、電子情報通信学会大会 岡山(3.22, 2012)

(4) 榎波康文 「低消費電力ハイブリッド型ポリマー光変調器」先端光 ICT シンポジウム 東京(2.17, 2011)

(5) 榎波康文 「高速超低電圧駆動ポリマー光変調器」第 2 回光材料・応用技術研究会 (8.28, 2009)東京

国際学会講演

(6) Y. Enami and S. Suye, "Green Fluorescent Protein-Doped Sol-gel Silica Planar Waveguide to Detect Organophosphorus Compound", *3rd Asia Pacific Optical Sensors Conference (APOS2012)*, Sydney, Australia, 2nd of Feb, 2012.

(7) Y. Enami, J. Hong, J. Luo, and A. K-Y. Jen, "Polymeric hybrid waveguide modulators with high optical stability and high electro-optic coefficient", *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) pacific rim 2011, Conference proceedings*, pp.664-666. (2011), Sydney, Australia, 1st of Sep, 2011.

(8) K. Tsuchiya, M. Ueda, A. Mulchandani, Y. Enami, and S. Suye, "Combination of optical

waveguide device and arming yeast for organophosphorus compounds fluorescence sensing system", *2010 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies, Hawaii, USA(2010)*, 20th of Dec, 2009.

(9) Y. Enami, D. Mathine, C. T. DeRose, R.A. Norwood, J. Luo, A. K-Y. Jen, and N. Peyghambarian, "Novel hybrid electro-optic polymer/sol-gel waveguide structure for Mach-Zehnder modulators and directional coupler switches", *SPIE(The International Society for Optical Engineering) Photonics West*, San Jose, CA, USA, 7213-28 (2009), 12th of Feb, 2009.

(10) Y. Enami and S.Suye, "Sol-gel silica planar waveguide biophotonic sensors doped with green fluorescent protein", *SPIE(The International Society for Optical Engineering) Optics & Photonics, San Diego, CA, USA, 7397-27 (2009)*, 5th of Aug, 2009.

(11) S. Suye, K. Tsuchiya, H. Makishima, A. Mulchandani, K. Kuroda, Y. Enami, M. Ueda, "Single cell analysis for organophosphorus compounds sensing using organophosphorus hydrolase and EGFP displayed arming yeast", *APBioCHEC'09 Biotechnology for Sustainable Development, MN-O2, Journal of Bioscience and Bioengineering*, vol 108, S148 (2009), 29th of Nov, 2009, Hawaii USA.

[産業財産権]

○出願状況 (計 4 件)

(1)名称: 「光変調器」

発明者: 榎波康文

権利者: 広島大学

種類: 特許

番号: 特願 2009-240219

出願年月日: 2009 年 10 月 19 日

国内外の別: 国内

(2)名称: 「ポリマー光変調器の製造方法」

発明者: 榎波康文、竹内浩史

権利者: 広島大学、三菱レイヨン共同

種類: 特許

番号: 特願 2011-162428

出願年月日: 2011 年 7 月 25 日

国内外の別: 国内

[その他]

<http://home.hiroshima-u.ac.jp/yenami/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

榎波 康文 (Enami Yasufumi)

広島大学・ナノデバイス・バイオ融合科学

研究所・特任教授

研究者番号: 90377474

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし